

# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : **10-268904**  
 (43)Date of publication of application : **09.10.1998**

(51)Int.CI. **G05B 13/02**  
**G05B 13/04**  
**G06F 15/18**

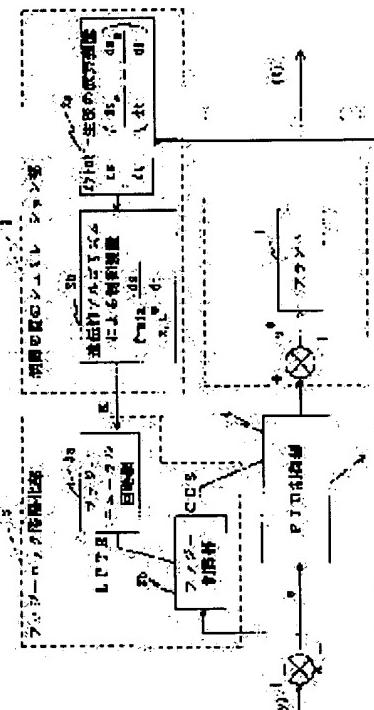
(21)Application number : **09-087426** (71)Applicant : **SERGEI V ULIYANOV**  
**YAMAHA MOTOR CO LTD**  
 (22)Date of filing : **21.03.1997** (72)Inventor : **SERGEI V ULIYANOV**

**(54) METHOD AND DEVICE FOR SELF-ORGANIZING FOR OPTIMALLY CONTROL NONLINEAR PHYSICAL CONTROLLED SYSTEM**

**(57)Abstract:**

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To optimally control a complicated and nonlinear controlled system by obtaining difference between the time differentiation of entropy inside of the controlled system and the time differential of entropy to be given to the controlled system to evolve a control rule by a genetic algorithm with the difference as an evaluation function.

**SOLUTION:** An arithmetic unit 2a calculates the time differential  $dS_u/dt$  of the entropy generation of a plant 1 and the time differential  $dS_c/dt$  of the entropy generation of the PID controller 4 of a plant 1 and outputs the entropy generated quantity  $dS/dt$  of the whole system being the difference of entropy generation. A controller 2b evolves input information K to the fuzzy neural circuit network 3a of a fuzzy logic hierarchical part 3 by genetic algorithm to reduce the difference between the time differential  $dS_u/dt$  of the entropy generation of the plant 1 and the time differential  $dS_c/dt$  of the entropy generation of the PID controller 4 with the entropy generating quantity  $dS/dt$  of the whole system as the evaluation function.



**LEGAL STATUS**

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>  
G 0 5 B 13/02

識別記号

F I  
G 0 5 B 13/02

M  
N  
Z

13/04  
G 0 6 F 15/18

5 5 0

13/04  
G 0 6 F 15/18

5 5 0 C

審査請求 未請求 請求項の数 6 FD (全 10 頁)

(21)出願番号 特願平9-87426

(71)出願人 597047990

(22)出願日 平成9年(1997)3月21日

セルゲイ ヴィ. ウリヤノフ  
東京都調布市小島町1-1-1 公務員宿  
舎R E504

(71)出願人 000010076

ヤマハ発動機株式会社  
静岡県磐田市新貝2500番地

(72)発明者 セルゲイ ヴィ. ウリヤノフ  
東京都調布市小島町1-1-1 公務員宿  
舎R E504

(74)代理人 弁理士 八木田 茂 (外1名)

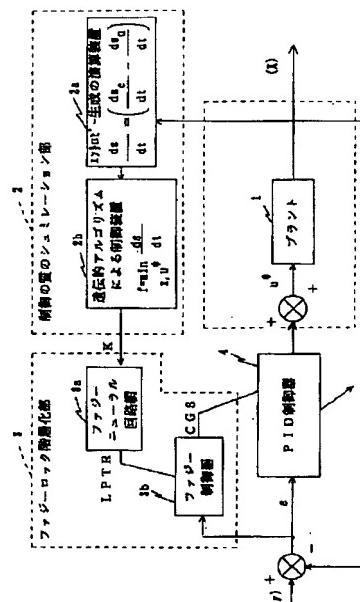
(54)【発明の名称】 非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化方法及び装置

## (57)【要約】

【課題】制御器設計の難しい非線形系の制御対象を制御できる新規な方法及び装置を提供する。

【解決手段】インテリジェント制御システムと複雑な制御対象の動的挙動とにおける、生成エントロピーの最小化及びAIロバスト制御システムの自己組織化を行うことを特徴とする。

【効果】これにより非線形のエネルギー散逸モデルとして描かれる複雑で非線形な制御対象を最適制御することができるようになる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 制御対象内部のエントロピーの時間微分 ( $dS_u/dt$ ) と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分 ( $dS_c/dt$ ) との差を求め、その差を評価関数として遺伝的アルゴリズムにより制御ルールを進化させることを特徴とする非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化方法。

【請求項2】 非線形の物理的な制御対象の非線形動作特性をリアプノフ関数により解析し、制御対象内部のエントロピーの時間微分 ( $dS_u/dt$ ) と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分 ( $dS_c/dt$ ) との差を求め、その差を評価関数として遺伝的アルゴリズムにより制御器の変数に関する制御ルールを進化させ、それに基き制御器の変数を補正する請求項1に記載の非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化方法。

【請求項3】 非線形の物理的な制御対象の非線形動作特性を表すリアプノフにより解析し、制御対象内部のエントロピーの時間微分 ( $dS_u/dt$ /関数 ( $V$ ) が  $V > 0$ 、制御対象内部のエントロピーの時間微分 ( $dS_u/dt$ ) と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分 ( $dS_c/dt$ ) との差が  $(dS_u/dt) - (dS_c/dt) < 0$  となるよう遺伝的アルゴリズムにより制御器の変数に関する制御ルールを進化させ、進化させた制御ルールに基き制御器の変数を補正する請求項1に記載の非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化方法。

【請求項4】 非線形の物理的な制御対象の運動方程式をリアプノフ関数 ( $V$ ) により熱力学的にモデル化して、制御対象の状態の安定性の制御について分析し、制御対象内部のエントロピーの時間微分 ( $dS_u/dt$ ) と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分 ( $dS_c/dt$ ) との差から制御対象及び制御系全体の全エントロピー生成量を計算し、その差が最小となる適合化関数を遺伝的アルゴリズムにより求める制御の質のシミュレーション部と、上記シミュレーション部から出力を教示信号として学習プロセスを用いてファジールールを決定し、得られたファジールールに従って、制御対象を制御する制御器の変数ゲインを変化させる制御ルールを形成するファジーロジック階層化部とを有することを特徴とする非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化装置。

【請求項5】 制御の質のシミュレーション部が、制御対象から得られる情報に基いて制御対象内部のエントロピー  $S_u$  の時間微分  $dS_u/dt$  と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピー  $S_c$  の時間微分  $dS_c/dt$  との差を演算するエントロピー演算部と、演算により得られたエントロピーの差  $(dS_u/dt) - (dS_c/dt)$  を評価関数としてその差が最小となるようにファジーロジック階層化部への教示信号を遺伝的アルゴリズムにより進

化させる遺伝的アルゴリズム処理部とから成っている請求項4に記載の非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化装置。

【請求項6】 ファジーロジック階層化部が、制御の質のシミュレーション部からの出力に応じて学習プロセスを用いてファジールールの参照テーブル信号を形成するファジーニューラル回路網と、ファジーニューラル回路網で得られたファジールールの参照テーブル信号に基いて制御対象を制御する制御器の変数ゲインを補正する変数ゲインスケジュール信号を発生するファジー制御器とから成っている請求項4に記載の非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、例えば機械的システム、バイオメカニカル・システム、ロボット工学、マイクロ・エレクトロメカニカル・システムなどの非線形の物理的な制御対象を最適に制御するための自己組織化方法及び装置に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】 物体の姿勢制御は古くから取り扱われてきたが、非線形系の姿勢制御について未開拓の分野であり、期待される応用分野も広い。従来、非線形系の制御器設計においては、一般的な解析手法がないため、線形近似して制御器を設計する場合が多い。すなわち、非線形の動作特性を評価することが困難であったため、非線形の動作特性をもつ制御対象（プラント）を制御する際には、制御対象の動作特性の適当な平衡点を見つけ、その平衡点の近傍で制御対象の動作特性を線形化して疑似的な運動特性に対して評価を行いながら制御を行う手法が採られている。

【0003】 また遺伝的アルゴリズムを用いて制御器を設計する試みもなされている。添付図面の図13には遺伝的アルゴリズムを用いた従来のAI制御システムの設計例をブロック線図で示し、Aは非線形の制御対象をなすプラント、Bはこの制御対象Aの動作を制御するPID制御器、Cは遺伝的アルゴリズム、Dはファジーニューラル回路網、Eはファジー制御器である。PID制御器Bは、

40 プラントAに対する逆モデルを構成し、プラントAの出力と同じ情報を入力すると、プラントAを、入力情報と同じ出力をするように作動させる制御信号  $u^*$  を出力するようにされている。遺伝的アルゴリズムCには、プラントAからの出力情報とPID制御器Bへの入力情報との誤差信号  $\varepsilon$  が入力され、誤差信号  $\varepsilon$  が小さくなるようにファジーニューラル回路網Dに対する入力情報  $\alpha$  を進化させる。すなわち、遺伝的アルゴリズムCにおける評価は、誤差信号  $\varepsilon$  が如何に小さくなるかである。最終的に得たい情報である入力情報  $\alpha$  の候補を複数個決め、これらを結合して複数の染色体（親）を生成する。各染色体について評価を行い、全ての親染色体に対する評価を終

了した後、複数の親染色体の中から優秀な子染色体を選択し、或いはランダムに子染色体を選択し、選択した子染色体を交叉させ、次世代の親染色体を生成する。この場合突然変異等も使用される。こうして生成された第2世代の親染色体全てについて評価を行い、上記と同じ進化処理を繰り返して次世代を生成する。このような進化処理は予め決められた世代に達するまで、または評価値が所定値になるまで行われ、最終世代の染色体を構成する素子を最終的な出力すなわち入力情報 $\alpha$ とする。ファジーニューラル回路網Dにおいては、遺伝的アルゴリズムCからの入力情報 $\alpha$ に基いてファジー制御器Eに用いるファジールールを決める。ファジーニューラル回路網Dで決められたファジールールを用いてファジー制御器EはPID制御器Bへ制御信号を出力する。この制御信号により、PID制御器Bは、プラントAからの出力情報とPID制御器Bへの入力情報との誤差信号 $\varepsilon$ が小さくなるように変数ゲインが補正される。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】非線形系の制御器設計において線形近似して制御器を設計する従来提案されてきた手法は、線形化される平衡点に近い領域では正確な制御を行うことができるが、この領域から離れるに従って制御の正確性が低下し、また系を取り巻く環境の大きな変化に対応できない等の問題点がある。また、図13に示すような遺伝的アルゴリズムを用いた手法では、PID制御器自体が線形化した運動方程式で構成されており、また遺伝的アルゴリズムでの評価もPID制御器に関連した情報に基いて行われるため、線形化による制御性の低下の問題は解決できず、また評価関数の取り方により結果が大きく変化するため、いかなる評価関数を採用するかが重要な問題となっている。

【0005】そこで、本発明は、インテリジェント制御システムと複雑な制御対象の動的挙動とにおける、生成エントロピーの最小化及びAIロバスト制御システムの自己組織化により、非線形のエネルギー散逸モデルとして描かれる複雑で非線形な制御対象の最適制御のための自己組織化方法及び装置を提供することを目的としている。

## 【0006】

【課題を解決するための手段】上記の目的を達成するために、本発明の第1の発明によれば、非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化方法は、制御対象内部のエントロピーの時間微分( $dS_u/dt$ )と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分( $dS_c/dt$ )との差を求め、その差を評価関数として遺伝的アルゴリズムにより制御ルールを進化させることを特徴としている。<sup>11</sup> 本発明の方法では、好ましくは、非線形の物理的な制御対象の非線形動作特性をリアブノフ関数により解析し、制御対象内部エントロピーの時間微分( $dS_u/dt$ )と制御対象を制御する制御器

から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分( $dS_c/dt$ )との差を求め、その差を評価関数として遺伝的アルゴリズムにより制御器の変数に関する制御ルールを進化させ、それに基き制御器の変数を補正するように構成され得る。本発明の方法においては、非線形の物理的な制御対象の非線形動作特性を表すリアブノフ関数(V)が $V > 0$ 、制御対象内部のエントロピーの時間微分( $dS_u/dt$ )と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分( $dS_c/dt$ )との差が $(dS_u/dt) - (dS_c/dt) < 0$ となるよう遺伝的アルゴリズムにより制御器の変数に関する制御ルールを進化させ、進化させた制御ルールに基き制御器の変数を補正するようにされ得る。

【0007】また、本発明の第2の発明によれば、非線形の物理的な制御対象の最適制御のための自己組織化装置は、非線形の物理的な制御対象の運動方程式をリアブノフ関数(V)により熱力学的にモデル化し、制御対象のプラントの状態の安定性の制御について分析し非線形動作特性を表すリアブノフ関数(V)が $V > 0$ 、制御対象内部のエントロピーの時間微分( $dS_u/dt$ )と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピーの時間微分( $dS_c/dt$ )との差から制御対象及び制御系全体の全エントロピー生成量を計算し、その差が最小となる適合化関数を遺伝的アルゴリズムにより求める制御の質のシミュレーション部と、上記シミュレーション部から出力を教示信号として学習プロセスを用いてファジールールを決定し、得られたファジールールに従って、制御対象を制御する制御器の変数ゲインを変化させる制御則を形成するファジーロジック階層化部とを有することを特徴としている。制御の質のシミュレーション部は、制御対象から得られる情報に基いて制御対象内部のエントロピー $S_u$ の時間微分 $dS_u/dt$ と制御対象を制御する制御器から制御対象へ与えられるエントロピー $S_c$ の時間微分 $dS_c/dt$ との差を演算するエントロピー演算部と、演算により得られたエントロピーの差 $(dS_u/dt) - (dS_c/dt)$ を評価関数としてその差が最小となるようファジーロジック階層化部への教示信号を遺伝的アルゴリズムにより進化させる制御部とから成り得る。またファジーロジック階層化部は、制御の質のシミュレーション部からの出力に応じて学習プロセスを用いてファジールールの参照テーブル信号を形成するファジーニューラル回路網と、ファジーニューラル回路網で得られたファジールールの参照テーブル信号に基いて制御対象を制御する制御器の変数ゲインを補正する変数ゲインスケジュール信号を発生するファジー制御器とから成り得る。

## 【0008】

【発明の実施の形態】以下添付図面の図1～図6に示す実施例に基づき本発明の実施の形態について説明する。

【実施例】図1には本発明の一実施例による自己組織化AI制御システムの構成を示し、1は非線形の物理的な制

御対象であるプラント、2は制御の質のシミュレーション部であり、エントロピー演算装置2aと、遺伝的アルゴリズムによる制御装置2bとを備えている。3はファジーロジック階層化部で、ファジーニューラル回路網3aと、\*

\* ファジー制御器3bとを備えている。4はプラント1の制御系を成すPID制御器である。

【0009】

まずオープンなダイナミック・システムとして扱った、制御対象（プラント）1の運動方程式の熱力学的モデル化について説明する。

一般に非線形系の運動方程式は、 $q$  を一般化座標、 $f$ 、 $g$  を任意の関数、 $F_e$  を制御入力とすると、次式で表される。

$$\ddot{q} = f(\dot{q}, q) + g(q) - F_e \quad (1)$$

上式の第2項の散逸項と制御入力に速度を掛けるとエントロピーの時間微分である次式が得られる。

$$dS/dt = f(\dot{q}, q) \dot{q} - F_e \dot{q} = dS_u/dt - dS_c/dt \quad (2)$$

ここで、 $dS/dt$  は系全体のエントロピーの時間微分、 $dS_u/dt$  は制御対象であるプラントのエントロピーの時間微分、 $dS_c/dt$  はプラントの制御系のエントロピーの時間微分である。

式(1)のリアブノフ関数として次式を選択する。

$$V = (\sum q^2 + S^2) / 2 = (\sum q^2 + (S_u - S_c)^2) / 2 \quad (3)$$

リアブノフ関数の解が大きいほどプラントの動作特性は安定する。

そこで系の安定化のため、リアブノフ関数とオープンなダイナミック・システムのエントロピー生成の間の関係として次式が導入される。

$$dV/dt = \sum q \dot{q} + (S_u - S_c) (dS_u/dt - dS_c/dt) < 0 \quad (4)$$

この式を変形すると、

$$\sum q \dot{q} < (S_u - S_c) (dS_c/dt - dS_u/dt) \quad (5)$$

が得られる。

【0010】

一方、ディナミック・システムの例としてDuffing振動子について考えると、その運動方程式は

$$\ddot{x} + x - x + x^3 = 0$$

(6) で表され、この式からエントロピー生成は

$$dS/dt = x^2$$

(7) として計算される。

また式(6)に対するリアプノフ関数は

$$V = (1/2)x^2 + U(x), U(x) = (1/4)x^4 - (1/2)x^2 \quad (8)$$

となる。

そこで式(8)を用いて式(6)を変形すると、

$$\ddot{x} + \dot{x} + \partial U(x) / \partial x = 0 \quad (9)$$

と表される。

式(9)の左辺にxを掛けると

$$(\ddot{x} + \dot{x} + \partial U(x) / \partial x)x = 0$$

となり、式(8)からリアプノフ関数を時間で微分すると

$$dV/dt = \dot{x}\ddot{x} + (\partial U(x) / \partial x)\dot{x}$$

となり、これを簡単な代数に変換すると、

$$dV/dt = (1/T)(dS/dt) \quad (10)$$

が得られ、ここでTは正規化ファクタである。

$dS/dt$ は系の安定性の評価として用いられる。 $dSu/dt$ はプラントの発生するエントロピーの時間変化であり、 $-dSc/dt$ は制御系からプラントに与えられる負のエントロピーの時間変化であると考えられる。

【0011】本発明では、プラントの制御系全体の外乱等のむだを、制御対象であるプラントのエントロピーの時間微分  $dSu/dt$  と、プラントの制御系のエントロピーの時間微分  $dSc/dt$  との差によって求め、これをリアプノフ関数で表された制御対象の安定性に関連させて評価が行われる。すなわちリアプノフ関数の時間微分言い換えればエントロピーの差が小さいほどプラントの動作特性が安定することになる。

【0012】次に制御の質のシミュレーションについて説明する。図1の線図において、PID制御器4からの制御信号uと外乱などのノイズm(t)との和であるランダム入力信号u\*はプラント1に加えられ、プラント1の出力xとなる。プラント出力xによるランダム信号は、制御の質のシミュレーション部2の一部を成する工

ントロピー生成の演算装置2aに導入される。エントロピー生成の演算装置2aにおいては上述のようにして制御対象であるプラント1のエントロピー生成の時間微分  $dSu/dt$  及びプラント1のPID制御器4のエントロピー生成の時間微分  $dSc/dt$  を演算し、式(2)で表されるエントロピー生成の差である系全体のエントロピーの生成量  $dS/dt$  を出力する。

【0013】遺伝的アルゴリズムによる制御装置2bは、エントロピー生成の演算装置2aからの出力である系全体のエントロピーの生成量  $dS/dt$  を評価関数として、制御対象であるプラント1のエントロピー生成の時間微分  $dSu/dt$  とPID制御器4のエントロピー生成の時間微分  $dSc/dt$  との差が小さくなるように、すなわち制御系全体のむだが少なくなるように、ファジーロジ

ック階層化部3のファジーニューラル回路網3aに対する入力情報Kを遺伝的アルゴリズムにより進化させる。この場合評価は世代交代毎に行われ、最終的出力情報Kはファジーニューラル回路網3aにおいてエントロピーの差を最も小さくできるファジールールを選択するのに最適な情報に進化される。

【0014】更にファジーロジック階層化システムについて説明する。ファジーロジック階層化部3は、PID制御器4からの制御信号uにおけるランダムな外乱m

(t) 対するインテリジェントなファジー制御器3bの構造の適合化プロセスを実現するものである。ファジーロジック階層化部3におけるファジーニューラル回路網3aは遺伝的アルゴリズムによる評価装置2bからの出力情報Kを教示信号として受け、ファジー制御器3bで用いられるファジールールを決定する。すなわち、ファジーニューラル回路網3aでは、その学習プロセスを用いてファジー制御器3bのための知識ベースの生成ルールが形成される。ファジーニューラル回路網3aの出力は、ファジー制御器3bへの入力であるファジールールの参照テーブル信号LPTRを形成し、ファジー制御器3bの知識ベースを形成する自己組織化が行われる。ファジー制御器3bの出力である係数ゲイン・スケジュールCGSは、PID制御器4への入力となり、ファジーニューラル回路網3aからのファジールールの参照テーブル信号LPTRに従ってPID制御器4の係数ゲインを変化させる制御ルールを形成する。このようにして制御プロセスにおけるエントロピー生成の最小化による最適学習の能力を有するPID制御器4のロバストな構造と、ソフトコンピューティングの概念に基づ\*

ロボット本体5の質量	4. 40 kg
車輪6の質量	1. 40 kg
制御用ロータ9の質量	0. 70 kg
車輪6の半径	0. 123 m
車輪6から本体重心までの距離	0. 331 m
車輪6のx, z軸のまわりの慣性モーメント	0. 020 Nms <sup>2</sup>
車輪6のy軸のまわりの慣性モーメント	0. 040 Nms <sup>2</sup>
本体5のx軸のまわりの慣性モーメント	1. 588 Nms <sup>2</sup>
本体5のy軸のまわりの慣性モーメント	1. 588 Nms <sup>2</sup>
本体5のz軸のまわりの慣性モーメント	0. 013 Nms <sup>2</sup>
ロータ9のx軸のまわりの慣性モーメント	0. 039 Nms <sup>2</sup>
ロータ9のy軸のまわりの慣性モーメント	0. 039 Nms <sup>2</sup>
ロータ9のz軸のまわりの慣性モーメント	0. 077 Nms <sup>2</sup>

また、シミュレーションの初期条件として、初期位置に関して車輪6は0 rad、ヨー角は0 rad、ロール角及びピッチ角はそれぞれ0. 001 rad、ロータ9は0 radとし、初速は全て0 radとした。外乱は[-1. 0e-6, 1. 0e] Nmの一様乱数とした。遺伝的アルゴリズムのパラメータとして染色体数は100、世代数100、突然変異率0. 0008、交叉確率0. 64(2点交叉)とした。その他、ピッチ角またはロール角が1. 04 rad(約60°)を越えたら転倒とし

\*いたファジー制御器3bのための知識ベースの構造の自己組織化が実現され得る。

【0015】上記で説明した各処理により、PID制御器4はエントロピーの差を最も小さくできる情報をプラント1に出力できるようになる。プラント1のエントロピー生成の時間微分d S u / d tとPID制御器4のエントロピー生成の時間微分d S c / d tとの差が小さくなると、リアノフ関数の時間微分d V / d tが小さくなり、これによりプラント1の動作特性は安定する。また

10 リアノフ関数はプラント1の運動特性を非線形のまま評価する関数であり、またエントロピーの差非線形の運動方程式から求めるので、従来のように線形化を用いた制御とは異なり、制御の安定性が改善されることになる。

【0016】次に図2～図12を参照して本発明を用いて実施した一輪車の姿勢制御のシミュレーション例について説明する。図2及び図3には一輪車ロボットを示し、5はロボット本体で、ロボット本体5の下端には車輪6が装着され、ロボット本体5の両側面部には二組の4節閉リンク機構7a、7bが取付けられ、各リンク機構7a、7bにはそれぞれモータ8a、8bが装着されている。リンク機構7a、7bは一輪車ロボットのピッチ方向のバランスをとるように作用する。またロボット本体5の上端には制御用ロータ9が装着され、制御用ロータ9はロボット本体5内に設けたモータ10により駆動され、主としてロール方向のバランスをとるように作用する。なお11はジャイロセンサである。一輪車ロボットのパラメータは次のように設定した。

4. 40 kg
1. 40 kg
0. 70 kg
0. 123 m
0. 331 m
0. 020 Nms <sup>2</sup>
0. 040 Nms <sup>2</sup>
1. 588 Nms <sup>2</sup>
1. 588 Nms <sup>2</sup>
0. 013 Nms <sup>2</sup>
0. 039 Nms <sup>2</sup>
0. 039 Nms <sup>2</sup>
0. 077 Nms <sup>2</sup>

て扱うこととした。シミュレーションの結果を図4～図7のグラフに示す。図4のグラフは各部の角度の時間変化を示し、図5のグラフは各部の角速度の時間変化を示し、図6のグラフはロール角と同角速度の位相面グラフであり、また図7のグラフはピッチ角と同角速度の位相面グラフである。比較例として一定時間中に姿勢の変動が小さいほどよいとする一般的な評価関数を用いたシミュレーションの結果を図8～図11のグラフに示す。これらの両結果を比較すると、一般的な評価関数を用いたシ

ユミレーションでは染色体数100、世代数100の遺伝的アルゴリズムでは姿勢制御を行うことができず、予め制御方式を与える必要があるのに対して、エントロピーによる評価関数の遺伝的アルゴリズムにおいては染色体数100、世代数100の遺伝的アルゴリズムでも姿勢制御を行うことができた。また制御入力を直接評価できるので、制御方式を与えなくもよい。

【0017】また制御系の評価法としてエントロピーを考慮することの有用性を確認するため、図12には、一輪車ロボットからロータを省略して本体と車輪だけからなるモデルをたて同様なシュミレーションを行った結果を示す。このモデルでは車輪の回転角、車体のヨー角、ロール角、及びピッチ角の4自由度をもつが、姿勢安定に直接関わるのはロール角とピッチ角だけである。ロール角の制御はロール角に応じたトルクをヨー角に与え、本体が傾いた方向に向きを変えることで行い、ピッチ角に関しては直接制御を行った。また車輪に関しては $\tau_{\omega} = 0.1 (4.0 - \theta_{\omega})$ というトルクを与えた。ここで $\theta_{\omega}$ は車輪の回転速度である。遺伝的アルゴリズムを用いて学習させるものはヨー角とピッチ角の二つのPID制御器のパラメータとした。図12から分かるように遺伝的アルゴリズムによって求めたパラメータにより制御した時にはロール角及びピッチ角はほぼ一定に保たれ、姿勢制御が達成されているが、制御しなかった時には姿勢制御は達成されてない。

【0018】このロバストなAI制御システムの構造の適用範囲としては、確率論的環境における機械的システム（アクティブ制振）や、知能ロボット工学やメカトロニクス（移動ロボットのナビゲーション、マニピュレタ、群移動ロボットの制御等）、バイオメカニカル・システム（パワーアシストシステム、人工呼吸器のような医療システムにおける人工臓器の制御等）、マイクロ・エレクトロメカニカル・システム（流体中を移動するマイクロロボット棒）といったシステムにおける最適制御の問題を解決するのに応用できる。

【0019】また本発明によれば、遺伝的アルゴリズムによって達成されるファジー制御器の参照テーブルとファジーニューラル回路網との協調行動を実現することができる。ある特定の場合には、線形／非線形ニューラル回路網を有する、マルチモードのファジー制御器構造として実施することが可能である。その場合適合化ファジー制御器は、直感と本能とをもつ自己組織化AI制御システムを提供する。またこの適合化手法においては、PID制御器のフィードバック・ゲインは、量子力学的ファジーロジックと、求められた非線形運動方程式を用いた概略的解釈とに従って変更される。

【0020】さらに、本発明においては、遺伝的アルゴリズムをベースとしたファジールール用アクセラレータを有するファジーニューラル回路網における学習システムによって導かれるPID制御器に対する最適化構造に関

するファジー・チューニングルールを形成するのにも応用できる。この場合のファジー制御器は、階層的な2レベルの、部分的にインテリジェントな制御システムであり、下層（実行）レベルで通常のPID制御器に連なり、上層（協調）レベルで（異なったファジー推論による生成ルールを形成するファジー・インターフェース・モジュールを有する）知識ベースやファジー化／非ファジー化コンポーネントに連なるものである。さらにまた、本発明は量子力学的コンピューティングに基づく、ファジー制御のための並列ソフト・コンピューティング技術として実施することもできる。

#### 【0021】

【発明の効果】以上説明してきたように、本発明によれば、インテリジェント制御システムと複雑な制御対象の動的挙動との双方における生成エントロピーの最小化による制御の質的向上のための新しい物理的な方法と、AIロバスト制御システムの自己組織化構造の構築とで構成されるので、運動方程式中に速度の項をもつ全ての非線形系に適用することができ、また位置だけでなく制御入力の大きさも考慮した評価が可能となり、従って制御器設計の難しい非線形系の制御を達成するできるようになると共に、制御入力を直接評価するので制御方法が不明でも適用することができるようになる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施例を示す概略ブロック線図。  
 【図2】 本発明のシュミレーションに用いた一輪車ロボットを示す概略正面図。  
 【図3】 図2に示す一輪車ロボットの概略側面図。  
 【図4】 図2に示す一輪車ロボットを用いて実施した姿勢制御のシュミレーションの結果における各部の角度の時間変化を示すグラフ。

【図5】 図2に示す一輪車ロボットを用いて実施した姿勢制御のシュミレーションの結果における各部の角速度の時間変化を示すグラフ。

【図6】 図2に示す一輪車ロボットを用いて実施した姿勢制御のシュミレーションの結果におけるロール角と同角速度の位相面を示すグラフ。

【図7】 図2に示す一輪車ロボットを用いて実施した姿勢制御のシュミレーションの結果におけるピッチ角と同角速度の位相面を示すグラフ。

【図8】 図2に示す一輪車ロボットを用いて従来の方法で実施した姿勢制御のシュミレーションの結果における各部の角度の時間変化を示すグラフ。

【図9】 図2に示す一輪車ロボットを用いて従来の方法で実施した姿勢制御のシュミレーションの結果における各部の角速度の時間変化を示すグラフ。

【図10】 図2に示す一輪車ロボットを用いて従来の方法で実施した姿勢制御のシュミレーションの結果におけるロール角と同角速度の位相面を示すグラフ。

【図11】 図2に示す一輪車ロボットを用いて従来の方法で実施した姿勢制御のシュミレーションの結果におけるピッチ角と同角速度の位相面を示すグラフ。

50 【図11】 図2に示す一輪車ロボットを用いて従来の方法で実施した姿勢制御のシュミレーションの結果における各部の角速度の時間変化を示すグラフ。

法で実施した姿勢制御のシミュレーションの結果におけるピッチ角と同角速度の位相面を示すグラフ。

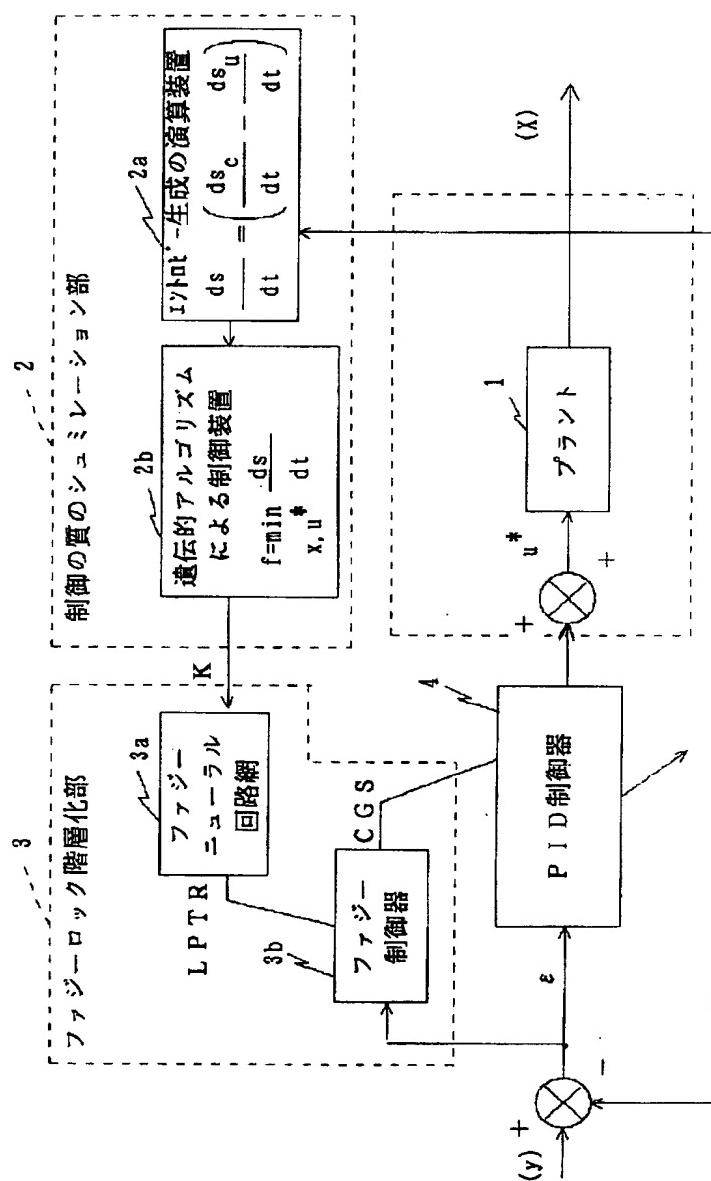
【図12】本発明による制御方法の有用性を例示する姿勢制御のシミュレーションの別の例を示すグラフ。

【図13】従来技術による制御方法の一例を示す概略ブロック線図。

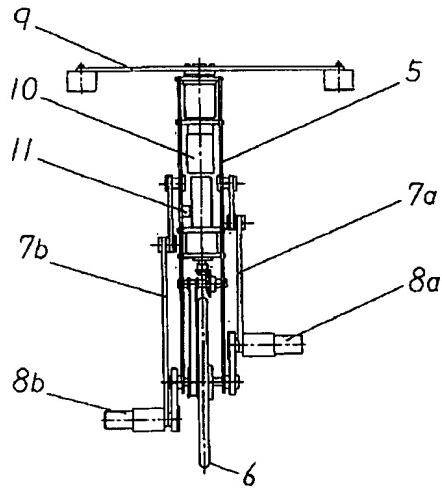
## 【符号の説明】

- 1 : プラント
- 2 : 制御の質のシミュレーション部
- 3 : ファジーロック階層化部
- 4 : PID制御器

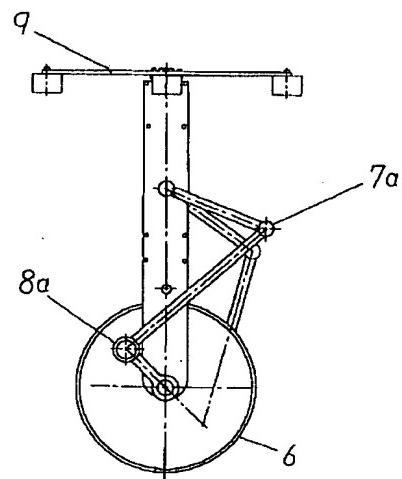
【図1】



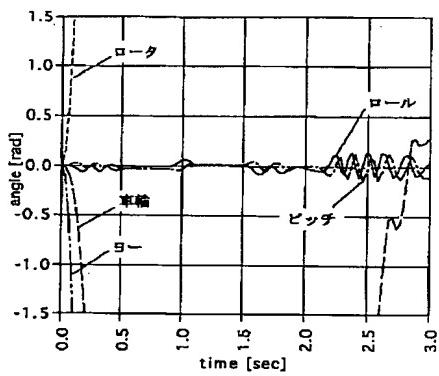
【図2】



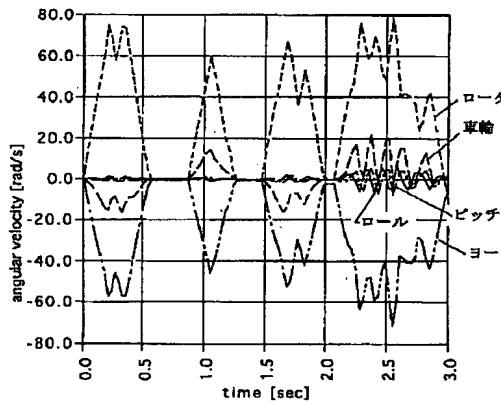
【図3】



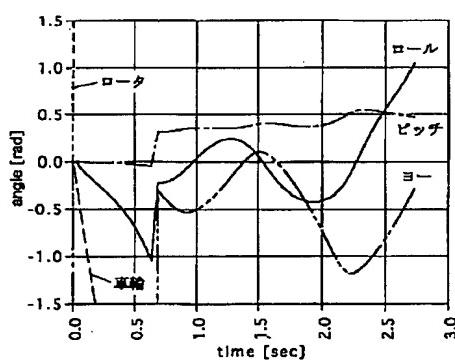
【図4】



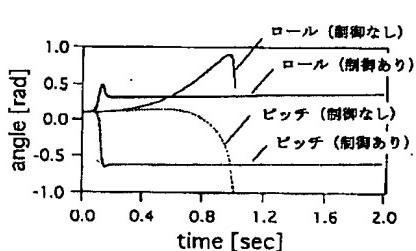
【図5】



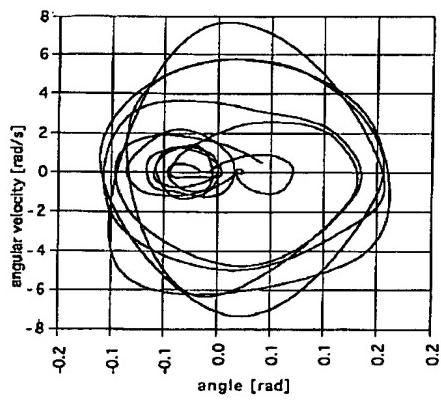
【図8】



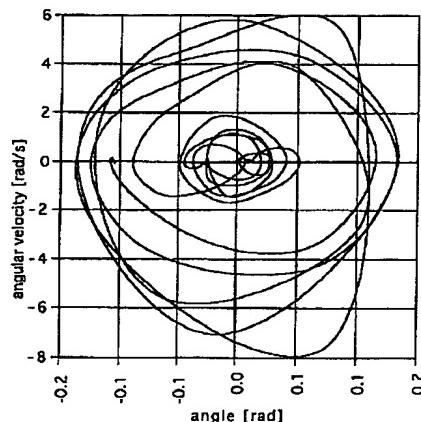
【図12】



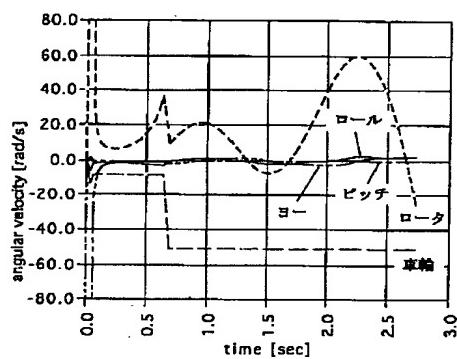
【図6】



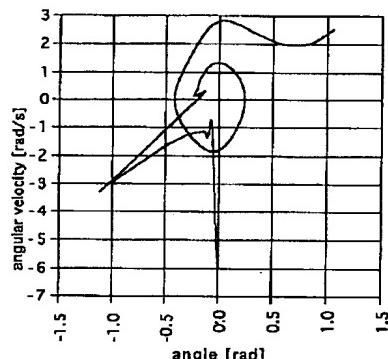
【図7】



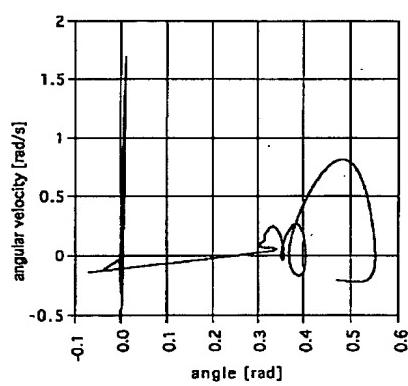
【図9】



【図10】



【図11】



【図13】

